

Regímenes hidrológicos según usos de la tierra: Efectos de la actividad forestal en sistemas semiáridos y húmedos

Hydrological regimes according to land use: Effects of forest activities in semiarid and humid systems

Esteban Jobbágy Gampel

RESUMEN

El establecimiento de plantaciones forestales se expande en Sudamérica, incentivado por los altos rendimientos y márgenes de ganancia, y en algunos casos el apoyo fiscal. Se evalúa cómo esta transformación afecta la producción de bienes y servicios de los ecosistemas, sintetizando información acerca de su influencia sobre la producción de biomasa y la dinámica del agua. Estimaciones satelitales y mediciones de campo muestran que la productividad primaria de las plantaciones forestales en los principales focos forestados de Argentina, Brasil, Chile, Uruguay, y Venezuela supera a la de la vegetación circundante, aún a la de la vegetación natural en buen estado de conservación. Este aumento en la productividad primaria es generalmente acompañado por una mayor evapotranspiración y un menor rendimiento hidrológico de áreas ocupadas por forestaciones, como sugiere una revisión global de estudios en pequeñas cuencas. En la llanura Pampeana, Argentina, donde el agua freática se encuentra cerca de la superficie, los árboles pueden utilizar agua subterránea, salinizando suelos y napas. Este proceso puede ser común en áreas ribereñas o de valle. Es apremiante generar información acerca de otros impactos de las forestaciones tales como cambios en la dinámica del fuego y el avance de especies invasoras. Reconocer integralmente la influencia de las forestaciones sobre la producción de servicios y bienes permitirá plantear sistemas y políticas forestales más sustentables y beneficiosas para la sociedad.

Palabras clave: Hidrología, Salinización, Forestación

SUMMARY

The establishment of forest plantations in South America is in expansion, stimulated by high growth rates and profit, and in some cases, by the fiscal support. The way how this transformation affects the production of ecosystem goods and services is evaluated, synthesizing information about its influence on biomass production and water dynamics. Satellite estimations and field measurements show that the primary productivity of forest plantations in the main

forested areas of Argentina, Brazil, Chile, Uruguay, and Venezuela overcomes that of the surrounding vegetation and even that of well conserved natural vegetation. This increase in productivity is generally accompanied by a major evapotranspiration and a minor hydrological performance of afforested areas, as suggested by a global review of small basins. In the Argentinian plain, the "Pampa", where the phreatic water is near the surface, trees use underground water, salinizing soils and waters. This process is common in riverside or valley areas. It is urgent to generate information about other impacts of such afforestations like changes in fire dynamics or the advance of invading species. An integral recognition of the influence of afforestations on the production of goods and services will enable the development of systems and policies that will be more sustainable and beneficial to society.

Keywords: Hydrology, Salinization, Afforestation

INTRODUCCIÓN

La transformación de la vegetación natural hacia plantaciones forestales de especies de rápido crecimiento se ha convertido en una actividad emergente a nivel global, con 187 millones de hectáreas en el año 2000 según FAO. Sudamérica presenta, después de Asia, la tasa más alta de crecimiento de esta actividad, con 0.5 millones de hectáreas de nuevas forestaciones que se incorporan cada año. En el año 2000, la superficie forestada alcanzaba los 10,5 millones de hectáreas (46% eucaliptos y 45% pinos). Esta actividad se concentra en unos pocos sectores del continente, destacándose el centro-sur de Chile, los estados brasileños de la región Sudeste (incluyendo Paraná), el litoral del Río Uruguay de la Argentina y el Uruguay, y el oriente de los Llanos de Venezuela. En estos sectores, la actividad toma especial relevancia ya que puede igualar o incluso superar en superficie a las actividades más tradicionales o extendidas en el continente como la agricultura o la ganadería. Asimismo, es posible que esta tendencia se mantenga o incremente en el futuro, debido al incipiente mercado de bonos de carbono. Se revisan aquí los efectos del establecimiento de plantaciones forestales sobre dos aspectos claves del funcionamiento de los ecosistemas y los bienes y servicios que brindan a la sociedad: la productividad primaria (ganancia de carbono) y el rendimiento y regulación hídrica (ciclo del agua).

GANANCIA Y ACUMULACIÓN DE CARBONO

La productividad primaria neta de un ecosistema, definida como su capacidad de generar biomasa vegetal, es uno de sus atributos clave tanto desde el

punto de vista agropecuario como ecológico (Schlesinger, 1997) y también, como ilustramos a continuación, uno de los más influenciados cuando la vegetación natural es reemplazada por plantaciones forestales. Una forma expeditiva de caracterizar la producción primaria de un ecosistema terrestre, es a través del uso de índices espectrales que usan la energía reflejada por la superficie para cuantificar la actividad fotosintética de los ecosistemas utilizando sensores montados en satélites. Particularmente efectivo es el índice verde normalizado (NDVI por sus siglas en inglés), que combina los valores de reflectancia en las bandas visible e infrarroja cercana del espectro generando valores que se aproximan a 1 cuando la actividad fotosintética, y por lo tanto la productividad primaria, es máxima, y a 0 cuando es nula (Tucker y Sellers, 1986, Jobbágy *et al.*, 2002). Utilizando el promedio anual del NDVI como descriptor de la productividad primaria se compararon sitios pareados de forestaciones y su matriz agrícola-ganadera circundante para 15 sitios distribuidos en seis países y nueve ecoregiones de Sudamérica que representan a los principales focos forestales del continente (Baldi *et al.*, 2008). Las plantaciones forestales presentaron en todas las zonas de estudio valores más altos que las matrices agrícola-ganadera circundantes (Figura 1). Las mayores diferencias se encontraron en las plantaciones forestales de Brasil sobre Mata Atlántica (Paraná, São Paulo, Espírito Santo). Las menores diferencias las presentaron las forestaciones en áreas cubiertas por pastizales y sabanas templadas de la Argentina y el Uruguay. Es notable asimismo el bajo valor de NDVI que presentaron las forestaciones de *Pinus caribea* de Venezuela. Éstos se relacionarían con la baja fertilidad natural del sistema y el déficit hídrico. Las plantaciones forestales presentaron valores más altos de NDVI que áreas protegidas de vegetación natural circundante en áreas de bosque subtropical húmedo (Figura 1b). Este hecho se relacionaría con que las forestaciones están compuestas por especies de rápido crecimiento (pinos y eucaliptos) que mantienen altas tasas de crecimiento hasta la cosecha y, en algunos casos, al posible efecto de la fertilización y control de plagas (Grier *et al.*, 1989). Para el caso de las forestaciones en pastizales, estos resultados confirman lo expuesto por diversos autores que muestran, mediante mediciones de campo, que el cambio en esta actividad humana conlleva importantes modificaciones en la PPN del orden del 22% (Jobbágy *et al.*, 2006). En este caso, las diferencias podrían estar explicadas por la mayor disponibilidad de agua con la que cuentan las forestaciones debido a sus raíces más profundas (Jobbágy y Jackson 2004). El único caso en donde el NDVI de las forestaciones es menor que el de la vegetación original es el de los bosques valdivianos. Es evidente entonces que las forestaciones logran mayores tasas de crecimiento o ganancias de carbono que la vegetación que reemplazan, y esto posiblemente es uno de los incentivos y oportunidades ecológicas de la forestación más relevantes.

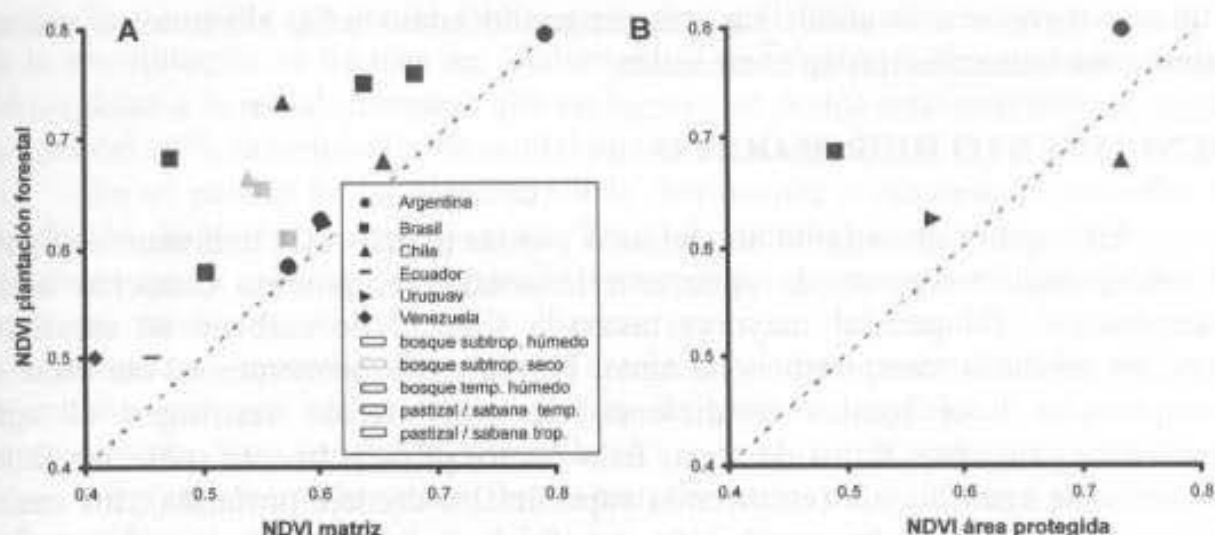


Figura 1. Comparaciones entre las plantaciones forestales con: A) la matriz agrícola-ganadera circundante, B) las áreas protegidas.

Desde la perspectiva del almacenamiento y secuestro de carbono, de creciente interés actualmente, cabe preguntarse también si la producción primaria mayor que alcanzan las forestaciones puede ser capitalizada en mayores reservas de carbono, tanto en la biomasa vegetal como en la materia orgánica de los suelos que ocupan. En este sentido, es importante separar la ganancia de carbono del ecosistema de la cantidad total de carbono que el ecosistema logra finalmente almacenar, lo que dependerá del balance entre las ganancias de carbono y las pérdidas (respiración total, herbivoría, cosecha) del ecosistema. Con respecto a la biomasa vegetal, las mayores ganancias de carbono son claramente capitalizadas en mayores acumulaciones de biomasa leñosa de los árboles y en menor medida en sus raíces más gruesas, cuya vida media es mucho mayor que la de las plantas herbáceas. Con respecto al suelo, algunas evidencias locales (Jobbágy y Jackson, 2003) y síntesis de trabajos realizados en todo el mundo (Paul *et al.*, 2002) indican que en el caso de los pastizales, el suelo mineral por lo general no ganaría materia orgánica tras ser forestado y que en sistemas húmedos como los de Uruguay el suelo podría perder carbono (Kirschbaum, 2006). Sin embargo, la acumulación de mantillo y la formación de horizontes orgánicos en la superficie del suelo podría albergar cantidades importantes de carbono, similares a la productividad de todo un año en las forestaciones (Jobbágy y Jackson, 2003). Un análisis profundo de la potencial compensación de la emisión de gases invernadero por cambios en el uso de la tierra que permita evaluar con certeza el papel de las forestaciones y los pastizales debería contemplar el tiempo de residencia del carbono en el ecosistema una vez fijado, y en este sentido sería útil ponderar diferencialmente el carbono estable alojado en la materia orgánica del suelo de aquel que reside en la biomasa

y puede regresar a la atmósfera tras ser usado como leña, alimento, o materia prima para industrias tras su combustión.

RENDIMIENTO HIDROLÓGICO

La captura de carbono atmosférico por las plantas esta íntimamente ligada al intercambio recíproco de agua con la atmósfera, proceso conocido como transpiración. En general mayores tasas de fijación de carbono se asocian a mayores pérdidas transpirativas de agua. Por su parte, aumentos en las tasas de transpiración bajo iguales condiciones de precipitación restringen el agua disponible para otros flujos de agua. Esto ocurre principalmente sobre los flujos de salida de agua líquida (escorrentía superficial o drenaje profundo), los cuales son responsables de la recarga de acuíferos y la alimentación de arroyos (rendimiento hidrológico). Cabe esperar entonces que los aumentos en la productividad asociados a la forestación de pastizales sean acompañados por aumentos en la transpiración y disminuciones en el rendimiento hidrológico.

A partir de la revisión exhaustiva de la literatura científica y de reportes técnicos de todo el mundo, Farley y colaboradores (2005) identificaron estudios que evaluaron los posibles cambios en el caudal erogado por pequeñas cuencas en regiones de vegetación natural baja (pastizales y arbustales) que fueron forestadas. Seleccionando aquellos estudios en los cuales se efectuó un seguimiento del caudal en cuencas pareadas de forestación (principalmente pinos y eucaliptos) y controles bajo vegetación natural (ver Farley *et al.*, 2005, para más detalle), se identificaron 26 pares que abarcaron cuatro continentes e incluyeron 504 observaciones de caudal anual. En este conjunto de datos se observó que en promedio la forestación de pastizales y arbustales redujo los valores absolutos de rendimiento hidrológico en un 39 % (167 mm año⁻¹), causando la reducción completa del caudal por al menos un año en 13 % de los casos (Farley *et al.*, 2005). Los impactos de la forestación sobre el caudal fueron más fuertes, en términos de merma relativa, bajo climas más secos. Esto se debe a que en estas zonas la fracción de la lluvia que alcanza los arroyos es de por sí baja y por lo tanto pequeños aumentos en la evapotranspiración puede causar fuertes cambios en el rendimiento hidrológico (Zhang *et al.*, 2001, Farley *et al.*, 2005). Es interesante notar que las reducciones de caudal fueron más importantes en plantaciones de eucaliptos que en plantaciones de pinos, con caídas en el valor absoluto del rendimiento hidrológico del 50 y 30%, respectivamente. Cuando se analiza esta información considerando la proporción de los ingresos de agua de lluvia que llegan a los arroyos (fracción de rendimiento hidrológico) bajo cada par de pastizal o arbustal natural vs. forestación, se observa que en muy pocos casos esta fracción se mantiene constante, siendo la reducción media de todos los pares del 15 % (porcentaje de la precipitación anual que deja de llegar a los cursos de

agua). Esto implica que, en términos generales, en pastizales en los que un 30% de la precipitación se traduce en rendimiento hidrológico, la forestación reducirá los caudales a la mitad, mientras que en lugares en donde este rendimiento inicial es sólo del 15%, la reducción de caudal podría ser total.

En el pasado se ha planteado a la forestación como una herramienta de regulación hidrológica de cuencas. Tras el establecimiento de plantaciones forestales en la cabecera de cuencas se esperaba lograr una reducción de los caudales máximos posteriores a lluvias grandes, reduciendo el peligro de inundaciones o episodios de severa erosión, y una redistribución de estos potenciales excesos en el tiempo capaz de generar caudales más constantes durante el año. Esta generalización se basó en estudios realizados en paisajes que siendo originariamente boscosos fueron transformados en agrícolas o simplemente deforestados y degradados y debe ser cuidadosamente revisada cuando la transformación involucra el pasaje de sistemas herbáceos a forestaciones. En esta situación, si bien es posible que los caudales máximos se vean reducidos, resulta equivocado esperar una mayor oferta de agua durante épocas secas y por el contrario es previsible que en estos períodos se acrecienten las caídas de caudal. La situación original de la vegetación y el contexto en el que se implantan las forestaciones son un factor determinante de sus impactos.

CICLO FORESTAL Y TALA RASA

Los efectos hidrológicos de las plantaciones forestales varían a lo largo del ciclo forestal, distinguiéndose por lo general rendimientos hídricos decrecientes desde la plantación al período de máximo crecimiento y cierre del dosel arbóreo. En plantaciones que permanecen más allá de la madurez o turno normal de corta y alcanzan situaciones de envejecimiento y autorraleo se ha observado una recuperación parcial del rendimiento hidrológico asociado a menores consumos de agua (Scott y Prinsloo, 2008). Sin embargo, el efecto más notable en el ciclo forestal es el las cosechas, especialmente si las mismas involucran tala rasa. En esta situación el ecosistema experimenta dos grandes cambios, por un lado la pérdida de cobertura vegetal y caída de consumo de agua, capaz de aumentar el rendimiento hídrico total, y por el otro alteraciones edáficas que pueden disminuir fuertemente la capacidad de infiltración y favorecer el escurrimiento superficial hacia cursos de agua, aumentando los rendimientos hídricos máximos después de lluvias y favoreciendo la erosión y transportes de sedimentos (Roberts, 2001). El peso relativo de ambos efectos (caída de la evapotranspiración vs. aumento del escurrimiento) puede variar y generar respuestas contrastantes a la tala rasa. En un caso extremo de degradación edáfica post-cosecha coincidente con situaciones de terrenos frágiles con pendientes elevadas, los flujos máximos pueden aumentar mucho más que el flujo total anual o medio, generando como consecuencia una

caída en el flujo mínimo o de estiaje, comprometiendo así la provisión constante de agua (Roberts, 2001). Otro aspecto fuertemente influenciado por la tala rasa es la composición química de las aguas. La eliminación de la cubierta vegetal aérea genera una interrupción el consumo de nutrientes y a la vez puede producir importantes aportes por la descomposición del material vegetal subterráneo remanente. En general especies químicas móviles y fuertemente influenciadas por el ciclado vegetal como nitratos y potasio suelen mostrar los incrementos más grandes tras la tala rasa. En algunos estudios los cambios químicos perduran por una década o más.

INTERACCIÓN CON AGUAS SUBTERRÁNEAS

En situaciones en que el agua subterránea está cerca de la superficie, como sucede en grandes llanuras como la pampa húmeda argentina o en áreas de valles de ríos, el establecimiento de forestaciones puede, además de reducir o interrumpir completamente las salidas líquidas de agua del ecosistema hacia los acuíferos, generar un flujo inverso en el que el acuífero complementa a la precipitación abasteciendo las necesidades hídricas de los árboles. La exploración de suelos y capas freáticas (agua subterránea más superficial) en áreas forestadas de la Pampa ha mostrado que en muchas ocasiones el intercambio entre capas freáticas y ecosistemas revierte su flujo neto. Se han reunido varias pruebas independientes de este cambio drástico en la hidrología. Observaciones detalladas de los niveles de capas freáticas en plantaciones forestadas y áreas adyacentes muestran que bajo las plantaciones forestales las capas freáticas se profundizan, generando desniveles de más de medio metro en solo una cuadra de distancia, explicables únicamente por un uso intenso del agua freática por la vegetación, y análogos a las depresiones de capas freáticas generadas por el bombeo continuo de agua subterránea. Registros horarios de nivel freático muestran un característico patrón de fluctuaciones diarias en las forestaciones pero no en los pastizales vecinos. Estos descensos diurnos y ascensos nocturnos de nivel, que pueden alcanzar hasta diez centímetros, son una prueba adicional del consumo de agua subterránea y muestran una muy buena correlación con estimaciones independientes de la transpiración de los árboles.

Una gran parte de la expansión forestal de las últimas décadas en Sudamérica se ha concentrado en áreas de pastizal. Esto implica impactos de la forestación sobre algunas propiedades de los ecosistemas, diferentes a los que podrían esperarse en regiones naturalmente boscosas o selváticas que son reforestadas. Nos hemos concentrado en esta sección en el agua por que presenta una dimensión clave del funcionamiento de los ecosistemas y un nexo elemental entre ellos y las sociedades locales o a veces distantes, y hemos planteado que las forestaciones establecidas sobre grandes áreas afectan a este recurso al liberar

como vapor hacia la atmósfera parte del agua que normalmente alcanzaría ríos y acuífero. El mismo proceso puede ofrecer beneficios en sistemas que siendo boscosos originalmente han sufrido severas alteraciones hidrológicas tras ser deforestados. El ejemplo más conocido a nivel mundial en este sentido es posiblemente el de las áreas de bosque seco de Australia que, tras transformarse en cultivos un siglo y medio atrás, sufrieron el síndrome denominado "salinización de tierras de secano". Este proceso involucró que bosques secos (precipitación de 400-800 mm año⁻¹) con flujos nulos de drenaje profundo (pérdidas evaporativas iguales a la precipitación) y capas freáticas ubicadas a más de 50 metros de profundidad se transformaran en cultivos anuales en los que el drenaje profundo paso a ser un flujo importante, causando ascensos lentos pero constantes de las capas freáticas (George *et al.*, 1997). Este problema silencioso mostró su cara cuando los acuíferos, originalmente muy profundos, asomaron sobre la superficie del paisaje trayendo consigo una alta carga de sales (Figura 2). Hoy Australia ha perdido una gran cantidad de tierras agrícolas como resultado de este proceso y la reforestación se plantea e implementa como una de las pocas soluciones al problema, mostrando resultados promisorios sólo cuando más de tres cuartos de las cuencas se reforestan.

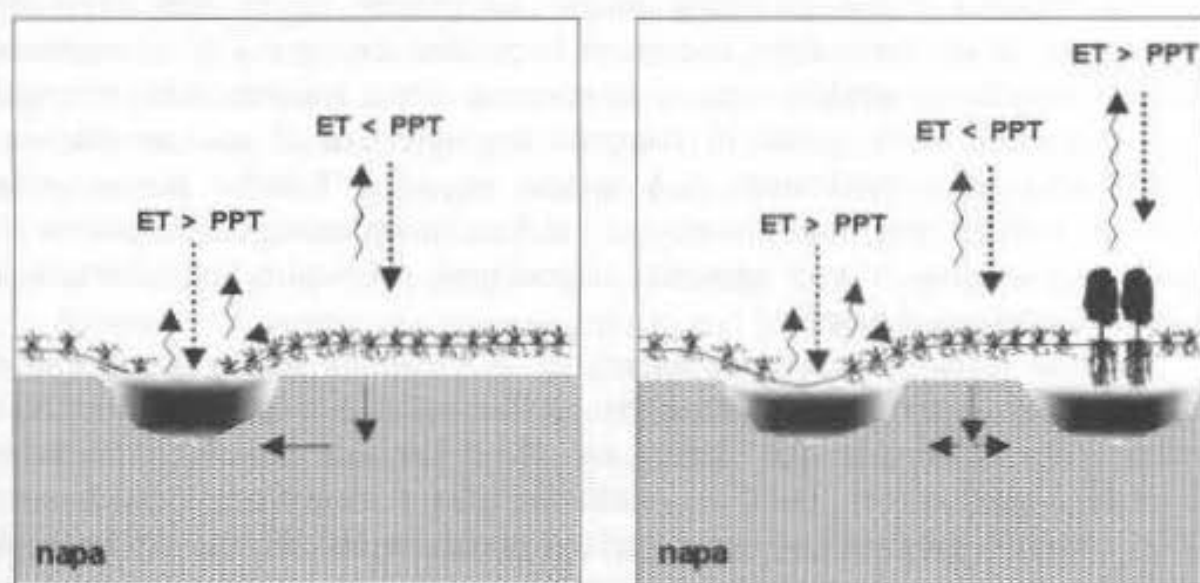


Figura 2. Balance hidrológico y acumulación de sales en regiones subhúmedas sin árboles y modificaciones asociadas al establecimiento de forestaciones. En condiciones naturales el balance hídrico de la matriz del paisaje es positivo, es decir, la evapotranspiración (ET) es inferior a la precipitación (PPT). Los excesos hídricos generan niveles freáticos elevados expuestos a la superficie en las zonas más bajas del paisaje donde se evacua agua y se acumulan sales. El establecimiento de una forestación genera un foco de mayor demanda de agua que es abastecida por la contribución freática y es funcionalmente equivalente al área baja.

A diferencia de Australia, Sudamérica ve reemplazar masivamente sus áreas de bosques secos por agricultura recién en las últimas décadas, en parte gracias a su gran reserva de tierras más húmedas. Hasta dónde se ha podido indagar no hay evidencias claras de que el problema australiano este aflorando en nuestro continente pero se requiere una exploración urgente de esta posibilidad. Se ha constatado, sin embargo, que en San Luis (Argentina) los montes semiáridos han mantenido un drenaje profundo nulo a pesar del alto aumento de las precipitaciones del último siglo y que en cambio los terrenos destinados a la agricultura mostraron valores positivos de drenaje. En un contexto "australiano" de cambios en el uso del territorio de bosques secos, la forestación, por las mismas razones que la vuelven cuestionable en pastizales, podría ser beneficiosa en paisajes agrícolas del cordón semiárido comprendido por el continuo (de S a N) del Espinal-Chaco-Cerrado-Caatinga.

CONCLUSIÓN

Caracterizar a las forestaciones como un uso de la tierra inherentemente bueno, basándose, por ejemplo, en una mirada restringida a sus altos rendimientos, o malo, enfocando únicamente los costos hidrológicos aquí expuestos, llevaría a una polémica estéril. El análisis de la conveniencia de forestar o no un territorio debe reconocer la posible existencia de compromisos entre los productos y servicios que el ecosistema ofrece bajo distintos escenarios de uso, algo que varía según el contexto ecológico en el que se plantea el establecimiento de plantaciones. Un mismo esquema forestal puede generar cambios de distinta magnitud y sentido en el funcionamiento del ecosistema si es aplicado en pastizales, tierras agrícolas degradadas, o bosques naturales que han sido deforestados en el pasado.

Mucho resta por aprender acerca de la dinámica del agua en sistemas forestados. Las investigaciones en curso en Sudamérica y en otros continentes generan dudas y alertas que deben ser atendidas por los distintos actores incluyendo a productores, políticos, ambientalistas y científicos; pero muestran también caminos para reconciliar o incluso potenciar las facetas productivas y ambientales de las plantaciones forestales cuando las mismas se integran inteligentemente al contexto que las rodea.

REFERENCIAS

- Baldi G, MD Noretto, R Aragón, F Aversa, JM Paruelo, EG Jobbágy. 2008. Long-term satellite ndvi data sets: Evaluating their ability to detect ecosystem functional changes in South America. *Sensors* 8: 5397-5425

- Farley KA, EG Jobbágy, RB Jackson. 2005. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology* 11: 1565–1576
- George R, D McFarlane, B Nulsen. 1997. Salinity threatens the viability of agriculture and ecosystems in Western Australia. *Hydrogeology Journal* 5: 6-21
- Grier CC, KM Lee, NM Nadkarni, GO Klock, PJ Edgerton. 1989. Productivity of forests of the United States and its relation to soil and site factors and management: a review. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-222.
- Jackson RB, JL Banner, EG Jobbágy, WT Pockman, DH Wall. 2002. Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature* 418: 623-626
- Jobbágy EG, OE Sala, JM Paruelo. 2002. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: A remote sensing approach. *Ecology* 83: 307-319.
- Jobbágy, EG, M Vasallo, K Farley, G Piñeiro, M Garbulsky, M Noretto, R Jackson, JM Paruelo. 2006. Forestación en pastizales: Hacia una visión integral de sus oportunidades y costos ecológicos. *Agrociencia (Uruguay)* 10: 109-134.
- Jobbágy EG, RB Jackson. 2003. Patterns and mechanisms of soil acidification in the conversion of grasslands to forests. *Biogeochemistry* 54: 205-229.
- Jobbágy EG, RB Jackson. 2004. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biology* 10: 1299-1312.
- Kirschbaum MUF. 2006. Temporary carbon sequestration cannot prevent climate change. *Mitigat Adapt Strategies Glob Change* 11(5–6): 1151–1164
- Paul KI, PJ Polglase, JG Nyakuengama, PK Khanna. 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management* 168: 241-257.
- Roberts J. 2001. Catchment and process studies in forest hydrology: implications for indicators of sustainable forest management. In: (RJ Raison et al. – Eds) *Criteria and indicators for sustainable forest management*. IUFRO 7 – CABI Publishers pp 259-310.
- Schlesinger WH. 1997. *Biogeochemistry*. Academic Press. 588 pp.
- Scott DF, FW Prinsloo. 2008. Longer-term effects of pine and eucalypt plantations on streamflow. *Water Resources Research* 44:10.1029/2007WR00678.
- Tucker CJ, PJ Sellers. 1986. Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing* 7: 1395-1416
- Zhang L, WR Dawes, GR Walker. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37: 701-708.